



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

Offenlegungsschrift
DE 101 59 961 A 1

Int. Cl.⁷:
C 03 C 3/06
C 03 B 37/018
G 02 B 1/00

(21) Aktenzeichen: 101 59 961.7
 (22) Anmeldetag: 6. 12. 2001
 (43) Offenlegungstag: 26. 6. 2003

⑦ Anmelder:
Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG, 63450 Hanau,
DE

72) Erfinder:
Kühn, Bodo, 63450 Hanau, DE; Uebbing, Bruno, Dr.,
63755 Alzenau, DE; Trommer, Martin, Dr., 36381
Schlüchtern, DE; Ochs, Stefan, Dr., 65520 Bad
Camberg, DE; Thomas, Stephan, Dr., 63538
Großkrotzenburg, DE; Kaiser, Steffen, 63452 Hanau,
DE; Vydra, Jan, Dr., 63456 Hanau, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54) Quarzglasrohling für ein optisches Bauteil sowie Verfahren zur Herstellung und Verwendung desselben

(57) Die vorliegende Erfindung betrifft einen Quarzglasrohling für ein optisches Bauteil zur Übertragung ultravioletter Strahlung einer Wellenlänge von 250 nm und kürzer sowie dessen Verwendung für den Einsatz in der Mikrolithographie in Verbindung mit ultravioletter Strahlung einer Wellenlänge von 250 nm und kürzer. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung des Quarzglasrohlings.

Ein derartiger Quarzglasrohling soll eine geringe induzierte Absorption aufweisen und gleichzeitig hinsichtlich Kompaktierung und Dekompaktierung optimiert sein. Der erfindungsgemäße Quarzglasrohling weist folgende Eigenschaften auf:

eine Glasstruktur im Wesentlichen ohne Sauerstoffdefektstellen,

stellen, einen H₂-Gehalt im Bereich von $0,1 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ bis $4,0 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³, einen OH-Gehalt im Bereich von 125 Gew.-ppm bis 450 Gew.-ppm, einen Gehalt an SiH-Gruppen von weniger als 5×10^{16} Moleküle/cm³,

eine Inhomogenität im Brechungsindex Δn von weniger als 2 ppm und
 eine Spannungsdoppelbrechung von weniger als 2 nm/cm.

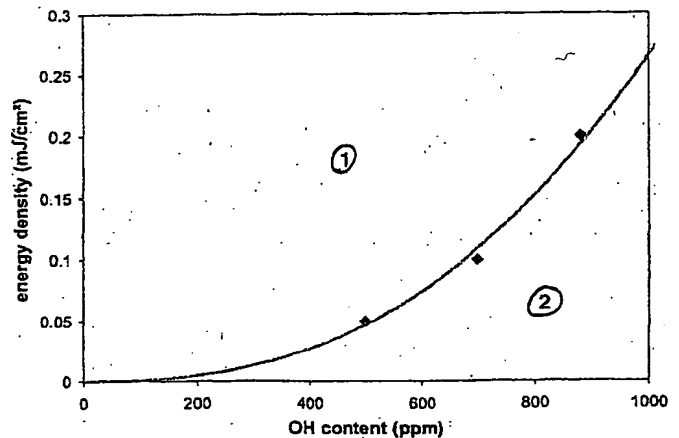
Für die erfindungsgemäße Verwendung genügt der Quarzglasrohling hinsichtlich des minimalen und maximalen Wasserstoffgehalts C_{H2min} bzw. C_{H2max} sowie des OH-Gehalts C_{OH} den Bemessungsregeln (2), (3) und (4), wobei P für die Pulszahl und ϵ für die Energiedichte steht:

$$C_{H2min} [\text{Moleküle/cm}^3] = 1 \times 10^6 \epsilon^2 P \quad (2),$$

$$C_{H2max} [\text{Moleküle/cm}^3] = 2 \times 10^{18} \epsilon \quad (3),$$

$$C_{OH} [\text{Gew.-ppm}] = 1700 \cdot \epsilon [\text{mJ/cm}^2]^{0,4} \pm 50 \quad (4).$$

...



DE 101 59 961 A 1

DE 101 59 961 A 1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Quarzglasrohling für ein optisches Bauteil zur Übertragung ultravioletter Strahlung einer Wellenlänge von 250 nm und kürzer.

[0002] Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung eines derartigen Quarzglasrohlings, umfassend die Herstellung mindestens einer ersten, zylinderförmigen Quarzglasvorform durch Flammenhydrolyse einer Si-enhaltenden Verbindung, wobei SiO_2 -Partikel gebildet und auf einem rotierenden Träger schichtweise unter Bildung eines porösen Sootkörpers abgeschieden werden und der Sootkörper anschließend zu der Quarzglasvorform verglast wird, die über ihr Volumen einen inhomogenen H_2 -Konzentrationsverlauf aufweist

[0003] Außerdem betrifft die Erfindung eine Verwendung eines Quarzglasrohlings für die Herstellung eines Bauteils für den Einsatz in der Mikrolithographie in Verbindung mit ultravioletter Strahlung einer Wellenlänge von 250 nm und kürzer.

[0004] Optische Bauteile aus Quarzglas werden insbesondere für die Übertragung energiereicher, ultravioletter Laserstrahlung beispielsweise als optische Fasern oder in Form von Belichtungsoptiken in Mikrolithographiegeräten für die Herstellung hochintegrierter Schaltungen in Halbleiterchips eingesetzt. Die Belichtungssysteme moderner Mikrolithographiegeräte sind mit Excimerlasern bestückt, die energiereiche, gepulste UV-Strahlung einer Wellenlänge von 248 nm (KrF-Laser) oder von 193 nm (ArF-Laser) abgeben.

[0005] Kurzwellige UV-Strahlung kann in optischen Bauteilen aus synthetischem Quarzglas Defekte erzeugen, die zu Absorptionen führen. Neben den Bestrahlungsbedingungen hängen Art und Ausmaß einer Defektbildung und der dadurch induzierten Absorption von der Qualität des jeweiligen Quarzglases ab, die im wesentlichen durch strukturelle Eigenschaften, wie Dichte, Brechzahlverlauf und Homogenität und von der chemischen Zusammensetzung bestimmt wird. [0006] Eine modellhafte Formel drückt diesen Zusammenhang zwischen den Bestrahlungsbedingungen, den Materialfaktoren und der induzierten Absorption α_{in} folgendermaßen aus:

$$\alpha_{\text{in}} = a \times \epsilon^b \times P \quad (1)$$

wobei a und b Materialfaktoren sind und ϵ und P für die Energiedichte bzw. die Pulszahl stehen.

[0007] Die Anzahl der induzierten strukturellen Defekte und die dadurch induzierte Absorption sind also abhängig von der Anzahl der einwirkenden Laserpulse und deren Energiedichte sowie von Materialfaktoren.

[0008] Der Einfluß der chemischen Zusammensetzung des Quarzglases auf das Schädigungsverhalten bei der Bestrahlung mit energiereichem UV-Licht ist beispielsweise in der EP-A1 401 845 beschrieben. Eine hohe Strahlenbeständigkeit ergibt sich demnach bei einem Quarzglas, das sich durch hohe Reinheit, einen OH-Gehalt im Bereich von 100 bis ca. 1000 Gew-ppm und gleichzeitig durch eine relativ hohe Wasserstoffkonzentration von mindestens 5×10^{16} Molekülen pro cm^3 (bezogen auf das Volumen des Quarzglases) auszeichnet. Weiterhin weist das bekannte synthetische Quarzglas eine Spannungsdoppelbrechung von weniger als 5 nm/cm auf, und es ist weitgehend frei von Sauerstoffdefektstellen.

[0009] In der EP-A1 401 845 werden außerdem Verfahren zur Herstellung von synthetischem Quarzglas durch Flammenhydrolyse siliziumhaltiger Verbindungen beschrieben. Diese lassen sich anhand der Ausgangssubstanzen und der Art und Weise der Verglasung der abgeschiedenen SiO_2 -Partikel unterscheiden. Eine häufig eingesetzte Ausgangssubstanz bei der Herstellung von synthetischem Quarzglas durch Flammenhydrolyse ist SiCl_4 . Es werden aber auch andere, beispielsweise chlorfreie siliziumhaltige organische Verbindungen verwendet, wie Silane oder Siloxane. In jedem Fall werden auf einem rotierenden Substrat SiO_2 -Partikel schichtweise abgeschieden. Bei hinreichend hoher Temperatur auf der Oberfläche des Substrats kommt es zu einem unmittelbaren Verglasen der SiO_2 -Partikel ("Direktverglasen"). Im Unterschied dazu wird bei dem sogenannten "Sootverfahren" die Temperatur während der Abscheidung der SiO_2 -Partikel so niedrig gehalten, dass ein poröser Sootkörper gebildet wird, bei dem SiO_2 -Partikel nicht oder wenig verglast sind. Das Verglasen unter Bildung von Quarzglas erfolgt beim Sootverfahren durch nachträgliches Sintern des Sootkörpers. Beide Herstellungsverfahren führen zu einem dichten, transparenten, hochreinen Quarzglas, wobei die Herstellungskosten beim Sootverfahren niedriger sind als beim Direktverglasen.

[0010] Um mechanische Spannungen innerhalb des Rohlings abzubauen und um eine homogene Verteilung der fiktiven Temperatur zu erreichen, wird dieser üblicherweise getempert. In der EP-A 401 845 wird ein Temperprogramm vorgeschlagen, bei dem der Rohling einer 50-stündigen Haltezeit bei einer Temperatur von etwa 1100°C unterworfen wird und abschließend in einem langsamen Abkühlschritt mit einer Abkühlrate von 2°/h auf 900°C und dann im geschlossenen Ofen auf Raumtemperatur abgekühlt wird. Bei dieser Temperaturbehandlung kann es durch Ausdiffusion von Komponenten – insbesondere von Wasserstoff – zu lokalen Veränderungen der chemischen Zusammensetzung und zu einem Konzentrationsgradienten von den oberflächennahen Bereichen des Rohlings nach Innen kommen. Um die defektausheilende Wirkung von Wasserstoff auf die Strahlenbeständigkeit des Quarzglases zu erzielen, wird daher in der EP-A1 401 845 empfohlen, den getemperten Quarzglas-Rohling nachträglich mit Wasserstoff zu beladen, indem dieser bei erhöhter Temperatur in wasserstoffhaltiger Atmosphäre behandelt wird.

[0011] In der Literatur sind eine Vielzahl von Schädigungsmustern beschrieben, bei denen es bei andauernder UV-Bestrahlung zu einem Anstieg der Absorption kommt. Die induzierte Absorption kann zum Beispiel linear ansteigen, oder es wird nach einem anfänglichen Anstieg eine Sättigung erreicht. Weiterhin wird beobachtet, dass eine anfänglich registrierte Absorptionsbande zunächst wenige Minuten nach Abschalten des Lasers verschwindet, sich aber nach erneuter Bestrahlung schnell wieder auf dem einmal erreichten Niveau wiederherstellt. Dieses Verhalten wird als "rapid-damage-process" (RDP) bezeichnet. Hintergrund dieses Verhaltens ist, dass Wasserstoffmoleküle die Netzwerkdefekte im Quarzglas absättigen, wobei aber die Stabilität der Bindungen an den Defektstellen gering ist, so dass sie erneut aufbrechen, wenn das Bauteil wieder bestrahlt wird. Es ist auch ein Schädigungsverhalten bekannt, bei dem sich strukturelle Defekte offenbar derart kumulieren, dass sie sich in einer plötzlichen, starken Zunahme der Absorption äußern. Der starke Anstieg der Absorption bei dem zuletzt beschriebenen Schädigungsverhalten wird in der Literatur als SAT-Effekt bezeichnet.

[0012] Bei dem aus der EP-A1 401 845 bekannten Quarzglas verursacht UV-Strahlung nur eine vergleichsweise geringe Absorptionszunahme, so dass sich dieses Quarzglas insoweit durch eine hohe Beständigkeit gegenüber kurzwelliger UV-Strahlung auszeichnet. Jedoch können neben dem Auftreten von Absorption bzw. reduzierter Transmission auch andere Schädigungsmechanismen wirksam werden, die sich beispielsweise in der Generierung von Fluoreszenz oder in einer Veränderung des Brechungsindex zeigen können.

[0013] Ein bekanntes Phänomen in diesem Zusammenhang ist die sogenannte "Kompaktierung", die während bzw. nach Laser-Bestrahlung mit hoher Energiedichte auftritt. Dieser Effekt äußert sich in einer lokalen Dichteerhöhung, die zu einem Anstieg des Brechungsindex und damit zu einer Verschlechterung der Abbildungseigenschaften des optischen Bauteils führt.

[0014] Ein gegenteiliger Effekt kann jedoch ebenso auftreten, wenn ein optisches Bauteil aus Quarzglas mit Laserstrahlung geringer Energiedichte aber hoher Pulszahl beaufschlagt wird. Unter diesen Bedingungen wird eine sogenannte "Dekompaktierung" beobachtet (in der angelsächsischen Literatur auch als "rarefaction" bezeichnet), die mit einer Erniedrigung des Brechungsindex einhergeht. Dies führt zu einer Verschlechterung der Abbildungseigenschaften. In der Literatur wurde dies beschrieben von C. K. Van Peski, R. Morton und Z. Bor ("Behaviour of fused silica irradiated by low level 193 nm excimer laser for tens of billions of pulses", J. Non-Cryst. Solids 265 (2000) S. 285-289).

[0015] Kompaktierung und Dekompaktierung sind somit Defekte, die sich nicht zwangsläufig in einer Zunahme der strahlungsinduzierten Absorption äußern, die aber die Lebensdauer eines optischen Bauteils begrenzen können.

[0016] Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, einen Rohling aus synthetischem Quarzglas für ein optisches Bauteil für die Übertragung ultravioletter Strahlung einer Wellenlänge von 250 nm und kürzer bereitzustellen, das eine geringe induzierte Absorption aufweist und das gleichzeitig hinsichtlich Kompaktierung und Dekompaktierung optimiert ist. Weiterhin liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein kostengünstiges Verfahren zur Herstellung eines derartigen optischen Bauteils sowie eine geeignete Verwendung dafür anzugeben.

[0017] Hinsichtlich des Rohlings wird diese Aufgabe erfindungsgemäß durch eine Ausführungsform eines Quarzglas-Rohlings gelöst, der die Kombination folgender Eigenschaften aufweist:

- eine Glasstruktur im wesentlichen ohne Sauerstoffdefektstellen,
- einen H₂-Gehalt im Bereich von $0,1 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ bis $4,0 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³,
- einen OH-Gehalt im Bereich von 125 Gew-ppm bis 450 Gew-ppm,
- einen Gehalt an SiH-Gruppen von weniger als 5×10^{16} Molekülen/cm³
- eine Inhomogenität im Brechungsindex Δn von weniger als 2 ppm, und
- eine Spannungsdoppelbrechung von weniger als 2 nm/cm.

[0018] Unter einer Glasstruktur, die im wesentlichen frei von Sauerstoffdefektstellen ist, wird hier eine Glasstruktur verstanden, bei der die Konzentrationen von Sauerstoff-Unterschussdefekten und von Sauerstoff-Überschussdefekten unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze der Methode von Shelby liegen. Diese Nachweis-Methode ist veröffentlicht in "Reaction of hydrogen with hydroxyl-free vitreous silica" (J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 5 (Mai 1980), S. 2589-2593). Quantitativ ergibt sich dabei eine Anzahl an Sauerstoff-Unterschussdefekten oder an Sauerstoff-Überschussdefekten in der Glasstruktur von nicht mehr als etwa 10^{17} pro Gramm Quarzglas.

[0019] Idealerweise sind die angegebenen Komponenten über das Volumen des optischen Bauteils gleichmäßig verteilt. Die genannten Konzentrationsangaben beziehen sich hier auf das durchstrahlte Volumen des Bauteils. Der OH-Gehalt ergibt sich durch Messung der IR-Absorption nach der Methode von D. M. Dodd et al. ("Optical Determinations of OH in Fused Silica", (1966), S. 3911). Der H₂-Gehalt wird anhand einer Raman-Messung ermittelt, die erstmals von Khotimchenko et al. vorgeschlagen worden ist ("Determining the Content of Hydrogen Dissolved in Quartz Glass Using the Methods of Raman Scattering and Mass Spectrometry" Zhurnal Prikladnoi Spektroskopii, Vol. 46, No. 6 (Juni 1987), S. 987-991). Der Gehalt an SiH-Gruppen wird mittels Raman-Spektroskopie ermittelt, wobei eine Kalibrierung anhand einer chemischen Reaktion erfolgt: $\text{Si-O-Si} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si-H} + \text{Si-OH}$, wie in Shelby "Reaction of hydrogen with hydroxyl-free vitreous silica" (J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 5 (Mai 1980), S. 2589-2593) beschrieben.

[0020] Die Inhomogenität des Brechungsindex Δn wird interferometrisch bei einer Wellenlänge von 633 nm (He-Ne-Laser) bestimmt, wobei sich Δn als Differenz ergibt zwischen dem Maximalwert und dem Minimalwert der Brechungsindexverteilung ergibt, gemessen über dem optisch genutzten Flächenbereich, auch CA Bereich ("clear aperture") genannt. Der CA Bereich ergibt sich durch Projektion des durchstrahlten Volumens auf eine Ebene senkrecht zur Durchstrahlungsrichtung.

[0021] Die Spannungsdoppelbrechung wird interferometrisch bei einer Wellenlänge von 633 nm (He-Ne-Laser) nach der in "Measurement of the Residual Birefringence Distribution in Glass Laser Disk by Transverse Zeeman Laser" (Electronics and Communications in Japan, Part 2, Vol. 74, No. 5, 1991; (übersetzt aus Denshi Joho Tsushin Gakkai Ronbunshi Vol 73-C-I, No. 10, 1990 pp. 652-657) beschriebenen Methode ermittelt.

[0022] Gegenüber den bisher in der Literatur beschriebenen und im Hinblick auf eine hohe Strahlenbeständigkeit gegenüber kurzwelliger UV-Strahlung ausgelegten Quarzglas-Qualitäten, zeichnet sich das Quarzglas, aus dem der erfindungsgemäße Rohling besteht unter anderem durch einen vergleichsweise geringen Wasserstoffgehalt bei einem mittleren OH-Gehalt aus. Derartige Quarzglas ist weder mittels des oben beschriebenen "Sootverfahrens" noch durch "Direktverglasen" ohne weiteres herstellbar. Denn beim Direktverglasen wird üblicherweise Quarzglas mit einem OH-Gehalt von 450 bis 1200 Gew-ppm und einem H₂-Gehalt um 1×10^{18} Moleküle/cm³ erhalten, wogegen für Quarzglas, das nach dem Sootverfahren hergestellt wird, eher geringe OH-Gehalte im Bereich einiger Gew-ppm- bis 200 Gew-ppm typisch sind.

[0023] Es hat sich gezeigt, dass ein optisches Bauteil, das aus einem Quarzglas-Rohling mit den oben genannten Eigenschaften gefertigt wird, die Schädigungsmechanismen, die zu Kompaktierung und Dekompaktierung führen, vermeiden oder zumindest deutlich reduziert sind. Brechzahländerungen im Verlauf des bestimmungsgemäßen Einsatzes derartiger Bauteile werden vollständig oder weitgehend vermieden, so dass die genannten Schädigungsmechanismen die Le-

bensdauer der aus dem erfindungsgemäßen Rohling gefertigten optischen Bauteile nicht begrenzen.

[0024] Diese Wirkung der oben genannten Eigenschafts-Kombination auf das Schädigungsverhalten gegenüber kurzwelliger UV-Strahlung ist empirisch nachgewiesen worden, wie im Folgenden noch näher erläutert wird. Dabei hat sich außerdem gezeigt, dass OH-Gehalte von weniger als 125 Gew-ppm, wie sie für das nach dem Sootverfahren hergestellte Quarzglas typisch sind, zu Kompaktierung führen. Quarzglas mit OH-Gehalten oberhalb von mehr als 450 Gew-ppm zeigt eine stärkere Tendenz zu Dekompaktierung und – bei wasserstoffbeladenem Sootmaterial – das als "RDP" bezeichnete Schädigungsverhalten.

[0025] Der zu RDP führende Schädigungsmechanismus wirkt sich bei H_2 -Gehalten von mehr als $4,0 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ besonders deutlich aus. Außerdem zeigt ein derartiges Quarzglas eine stärkere Tendenz zur Dekompaktierung, wogegen bei einem H_2 -Gehalt von weniger als $0,1 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ die oben erwähnte defektausheilende Wirkung von Wasserstoff so gering ist, dass es während des bestimmungsgemäßen Einsatzes des optischen Bauteils zu nicht tolerierbaren Transmissionsverlusten kommt.

[0026] Demgegenüber ist beim erfindungsgemäßen Rohling das Quarzglas sowohl im Hinblick auf Kompaktierung als auch Dekompaktierung optimiert, und es weist gleichzeitig eine geringe induzierte Absorption gegenüber kurzwelliger UV-Strahlung auf. Diese Optimierung ermöglicht insbesondere den Einsatz von nach dem Sootverfahren hergestellten Quarzglas auch für optische Bauteile, die hohen Anforderungen an die Konstanz ihrer Abbildungseigenschaften unterliegen.

[0027] Es hat sich als besonders günstig erwiesen, wenn der OH-Gehalt im Rohling im Bereich von 200 Gew-ppm bis 350 Gew-ppm liegt. Ein OH-Gehalt in diesem Bereich stellt einen bevorzugten Kompromiss zwischen Dekompaktierung und Kompaktierung einerseits und RDP andererseits dar.

[0028] Vorteilhafterweise liegt der H_2 -Gehalt im Bereich von 1×10^{16} Moleküle/cm³ bis 3×10^{16} Moleküle/cm³. Bei einem Quarzglas-Rohling mit einem H_2 -Gehalt in diesem Bereich ist sowohl die günstige, defektausheilende Wirkung des Wasserstoffs in besonders hohem Maße vorhanden, und es wird gleichzeitig Dekompaktierung weitgehend vermieden. Auch diese Optimierung ermöglicht insbesondere den Einsatz von nach dem Sootverfahren hergestelltem Quarzglas auch für Anwendungsfälle, in denen Kompaktierung und Dekompaktierung kritische, die Lebensdauer begrenzende Effekte darstellen.

[0029] Hinsichtlich des Verfahrens zur Herstellung eines Quarzglasrohlings wird die oben angegebene Aufgabe ausgehend von dem eingangs genannten Verfahren erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass die Quarzglasvorform einer Homogenisierungsbehandlung unterzogen wird, durch welche ein radialer H_2 -Konzentrationsverlauf mit einer maximalen Abweichung von 25% von einem Mittelwert, der im Bereich von $0,1 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ bis $4,0 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ liegt, eingestellt wird.

[0030] Bei erfindungsgemäßen Verfahren wird ein H_2 -Gehalt eingestellt, der im Mittel im Bereich von $0,1 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ bis $4,0 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ liegt. Bei H_2 -Gehalten von mehr als $4,0 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ wirkt sich der zu RDP führende Schädigungsmechanismus besonders deutlich aus, wogegen bei einem H_2 -Gehalt von weniger als $0,1 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ die oben erwähnte defektausheilende Wirkung von Wasserstoff so gering ist, dass es während des bestimmungsgemäßen Einsatzes des optischen Bauteils zu nicht tolerierbaren Transmissionsverlusten kommt.

[0031] Der Sootkörper enthält herstellungsbedingt Wasserstoff. Die daraus erhaltene Quarzglasvorform weist üblicherweise über ihr Volumen einen inhomogenen H_2 -Konzentrationsverlauf auf. Die Inhomogenität H_2 -Konzentrationsverlauf stellt sich infolge der Temperaturbehandlung des Sootkörpers beim Verglasen ein. Aufgrund der hohen Diffusionsgeschwindigkeit von Wasserstoff in Quarzglas verarmen die oberflächennahen Bereiche beim Verglasen rascher als zentrale Bereiche des Sootkörpers bzw. der Quarzglasvorform. Der dadurch entstehende Konzentrationsgradient wird erfindungsgemäß durch eine anschließende Homogenisierungsbehandlung ganz oder teilweise beseitigt. Dabei wird ein radialer Verlauf der H_2 -Konzentration in der Quarzglasvorform eingestellt, derart, dass diese von dem Mittelwert um maximal 25% abweicht.

[0032] Im Unterschied zu dem oben beschriebenen, bekannten Verfahren wird erfindungsgemäß zunächst in der Quarzglasvorform der Wasserstoffgehalt in der erforderlichen Konzentration eingestellt – unter Inkaufnahme eines radialen H_2 -Konzentrationsgradienten – und erst anschließend wird der Wasserstoff mittels der Homogenisierungsbehandlung innerhalb der Quarzglasvorform verteilt. Wesentlich dabei ist, vor der Homogenisierungsbehandlung in der Quarzglasvorform genügend Wasserstoff enthalten ist, so dass im Verlauf der Homogenisierungsbehandlung ein Konzentrationsmittelwert im oben genannten Bereich eingestellt werden kann. Hierzu wird in der Quarzglasvorform vor der Homogenisierungsbehandlung ein über das Volumen gemittelter Wasserstoffgehalt eingestellt, der mindestens so hoch ist wie der einzustellende Mittelwert der H_2 -Konzentration. Der Wasserstoffgehalt in der Quarzglasvorform vor Homogenisierungsbehandlung wird im Folgenden auch als "anfänglicher Wasserstoffgehalt" bezeichnet.

[0033] Mittels der Homogenisierungsbehandlung wird erreicht, dass eine ursprünglich starker radialer Gradient im H_2 -Konzentrationsverlauf der Quarzglasvorform beseitigt oder vermindert wird.

[0034] Je homogener der Wasserstoff im Volumen der Quarzglasvorform verteilt ist, um so günstiger wirkt sich dies auf die optischen Eigenschaften des daraus gefertigten Bauteils oder der daraus gefertigten optischen Bauteile aus. Im Hinblick hierauf wird eine Verfahrensweise bevorzugt, bei der durch die Homogenisierungsbehandlung ein radialer H_2 -Konzentrationsverlauf mit einer maximalen Abweichung von 15% vom Mittelwert erhalten wird.

[0035] Als günstig hat es sich erwiesen, wenn die Quarzglasvorform durch Verglasen des Sootkörpers unter einer H_2 -enthaltenden Atmosphäre hergestellt wird. Hierdurch wird der oben erläuterte anfängliche Wasserstoffgehalt in der Quarzglasvorform eingestellt. Je nach Wasserstoffpartialdruck in der den Sootkörper umgebenden Atmosphäre wird dabei die Ausdiffusion von Wasserstoff aus dem Sootkörper vermindert, so dass sich ein geringerer radialer H_2 -Konzentrationsgradient von der freien Oberfläche nach Innen einstellt als ohne die wasserstoffhaltige Atmosphäre. Dies erleichtert die Einstellung eines homogenen, radialen H_2 -Konzentrationsverlaufs in der anschließenden Homogenisierungsbehandlung. Bei einem hohen Wasserstoffpartialdruck kann es aber auch zu einer zusätzlichen Beladung der Quarzglasvorform mit Wasserstoff kommen. Dabei bildet sich ein von Außen (Oberfläche) nach Innen abnehmender H_2 -Konzentrationsgradient aus, der ebenfalls in einer nachfolgenden Homogenisierungsbehandlung beseitigt oder verringert wird.

[0036] Vorzugsweise ist die H₂-enthaltende Atmosphäre beim Verglasen eine H₂/He-Atmosphäre oder eine H₂/N₂-Atmosphäre oder eine H₂/H₂O-Atmosphäre. Eine H₂/H₂O-Atmosphäre stellt sich zum Beispiel ein, wenn im Sootkörper enthaltenes Wasser mit Kohlenstoff reagiert, der beispielsweise aus Graphitelementen des Vergasungssofens stammen kann.

[0037] Daran anschließend oder alternativ dazu wird zur Einstellung des erforderlichen anfänglichen Wasserstoffgehalts vorteilhafterweise ein Verfahrensschritt durchgeführt, bei dem die Quarzglasvorform einer den Wasserstoffgehalt absenkenden Temperbehandlung unterzogen wird. Durch die Ausdiffusion lässt sich der anfängliche Wasserstoffgehalt besonders exakt einstellen.

[0038] Es wird eine Verfahrensweise bevorzugt, bei der die Homogenisierungsbehandlung durch Verdrillen und Wenden der Quarzglasvorform erfolgt. Hierbei lässt sich eine homogene Verteilung des in der Quarzglasvorform enthaltenen Wasserstoffs in allen Raumrichtungen erreichen. Durch einmaliges oder mehrmaliges Wenden werden in einer Ebene senkrecht zur Rotationsachse beim Verdrillen verbleibende Schlieren beseitigt. Das Homogenisieren von Quarzglas durch Verdrillen und Wenden ist in der DE 42 04 406 C2 und in der EP-A1 673 888 beschrieben.

[0039] Wie bereits erwähnt, ist ein Quarzglas mit den oben für den erfindungsgemäßen Rohling genannten Eigenschaften mittels "Sootverfahren" oder "Direktverglasen" nicht ohne weiteres herstellbar. Dieses Herstellungsproblem betrifft insbesondere die Einstellung eines mittleren OH-Gehalts im Bereich von 125 Gew.-ppm bis 450 Gew.-ppm. Die Einstellung eines OH-Gehalts oberhalb von etwa 300 Gew.-ppm durch Sootverfahren ist aufgrund einer beim Verglasen des Sootkörpers einsetzenden Blasenbildung problematisch, während durch Direktverglasen ein OH-Gehalt unterhalb von etwa 300 Gew.-ppm praktisch kaum zu erreichen ist.

[0040] Im Hinblick hierauf ergibt sich weitere Verbesserung, indem die Homogenisierungsbehandlung ein Mischen der ersten Quarzglasvorform mit einer zweiten Quarzglasvorform unter Bildung eines Mischquarzglases mit einem OH-Gehalt im Mittel im Bereich von 125 bis 450 Gew.-ppm insbesondere 200 bis 350 Gew.-ppm umfasst, wobei ein OH-Gehalt im Bereich von 125 Gew.-ppm bis 450 Gew.-ppm eingestellt wird.

[0041] Erfindungsgemäß wird daher der Rohling durch Mischen von mindestens zwei Quarzglas-Qualitäten erhalten, die sich in ihren OH-Gehalten unterscheiden. Die erste Quarzglasvorform (im Folgenden auch als "erstes Quarzglas" bezeichnet) weist dabei einen niedrigeren als den einzustellenden, mittleren OH-Gehalt auf und die zweite Quarzglasvorform (im Folgenden auch als "zweites Quarzglas" bezeichnet) einen höheren als den einzustellenden, mittleren OH-Gehalt auf. Durch das Homogenisieren ergibt sich ein Mischquarzglas, in welchem sich je nach eingestellten Mengenverhältnis von erstem Quarzglas und zweitem Quarzglas ein mittlerer OH-Gehalt zwischen den jeweiligen OH-Gehalten der Quarzglas-Qualitäten ergibt. Auf diese Weise lässt sich ein Mischquarzglas mit einem OH-Gehalt im Bereich von 125 Gew.-ppm bis 450 Gew.-ppm kostengünstig herstellen.

[0042] Das Mischen des ersten und des zweiten Quarzglases erfolgt entweder durch Erweichen der Gläser und Homogenisieren in einer Form, oder dadurch, dass aus den jeweiligen Quarzglas-Qualitäten hergestellte Formkörper miteinander verdrillt und anschließend durch Wenden homogenisiert werden.

[0043] Durch das Mischen der Quarzglas-Qualitäten wird auch hinsichtlich der übrigen Komponenten des erfindungsgemäßen Rohlings – insbesondere dem H₂-Gehalt und dem Gehalt an SiH-Gruppen – eine entsprechende mittlere Konzentration im Mischquarzglas erhalten.

[0044] Die daraus resultierenden Eigenschaften des Mischquarzglases stimmen mit denjenigen des erfindungsgemäßen Quarzglas-Rohlings überein, so dass auf die obigen Erläuterungen insoweit verwiesen wird.

[0045] In einer besonders bevorzugten Verfahrensweise werden zur Herstellung der zweiten Quarzglasvorform SiO₂-Partikel gebildet und auf einen rotierenden Träger abgeschieden und direkt verglast. Hierbei werden demnach Quarzglasqualitäten gemischt, von denen mindestens eine mittels Sootverfahren und mindestens eine andere mittels Direktverglasen erhalten wird. Diese Quarzglas-Qualitäten sind für die Einstellung eines mittleren OH-Gehalts gemäß der vorliegenden Erfindung besonders gut geeignet. Um Blasenbildung beim Verglasen zu vermeiden muss bei den nach dem Sootverfahren erhaltenen porösen Sootkörpern ein OH-Gehalt von maximal etwa 300 Gew.-ppm eingestellt sein. Hierzu werden die Sootkörper üblicherweise einer Dehydrationsbehandlung in trocknender Atmosphäre unterzogen, wobei sich der OH-Gehalt bis in den ppb-Bereich absenken lässt. Nach dem Verglasen und einer anschließenden Homogenisierung des Quarzglases liegt der H₂-Gehalt bei den nach dem Sootverfahren hergestellten Quarzglas in der Regel unterhalb der Nachweisgrenze von 1×10^{15} Molekülen/cm³. Demgegenüber weisen die durch Flammenhydrolyse nach dem Direktverglasen erzeugten Quarzgläser herstellungsbedingt einen relativ hohen OH-Gehalt von einigen hundert Gew.-ppm und einen hohen H₂-Gehalt von mehr als 10^{17} Molekülen/cm³ auf. Durch Mischen der beiden Quarzglas-Qualitäten kann je nach Einstellung der jeweiligen Mengenverhältnisse kostengünstig ein Misch-Quarzglas erhalten werden, das im Hinblick auf den einzustellenden H₂-Gehalt, vorzugsweise jedoch hinsichtlich des OH-Gehalts, optimiert ist.

[0046] Insbesondere im Hinblick auf die oben erläuterten typischen Unterschiede der chemischen Zusammensetzungen von Quarzglas, das nach dem Sootverfahren erhalten wird und solchem, das durch Direktverglasen erzeugt wird, wird eine Verfahrensweise bevorzugt, bei der das erste Quarzglas einen OH-Gehalt im Bereich von 10 Gew.-ppm bis 300 Gew.-ppm, das zweite Quarzglas einen OH-Gehalt im Bereich von 400 Gew.-ppm bis 1300 Gew.-ppm aufweist.

[0047] Dabei hat es sich als besonders vorteilhaft erwiesen, wenn das Mischen durch Verdrillen und Wenden von je einem Quarzglaskörper des ersten Quarzglases mit einem des zweiten Quarzglases erfolgt. Im einfachsten Fall handelt es sich bei den Quarzglaskörpern um langgestreckte Zylinder (Rohre und/oder Stäbe), die in einem ersten Verfahrensschritt längsseitig aneinanderliegend erweicht und dabei um eine parallel zur Längsachse verlaufenden Rotationsachse miteinander verdrillt werden. Dabei verbleibende Schlieren in einer Ebene senkrecht zur Rotationsachse werden durch einmaliges oder mehrmaliges Wenden beseitigt.

[0048] Hinsichtlich der Verwendung des Quarzglasrohlings wird die oben angegebene Aufgabe erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass für eine vorgegebene Pulszahl P ein Quarzglas ausgewählt wird, das einen Mindestwasserstoffgehalt C_{H2min} und einen Maximalwasserstoffgehalt C_{H2max} aufweist, die folgenden Bemessungsregeln genügen:

$$C_{H2min} [\text{Moleküle/cm}^3] = 1,0 \times 10^6 e^2 P \quad (2) \text{ und}$$

$$C_{H2max} [\text{Moleküle/cm}^3] = 2,0 \times 10^{18} \epsilon \quad (3)$$

(Pulsenergiedichte ϵ jeweils in mJ/cm^2).

- 5 [0049] Durch die Einstellung des Wasserstoffgehalts anhand der Bemessungsregeln (2) und (3) wird das Quarzglas hinsichtlich seines Schädigungsverhaltens gegenüber kurzwelliger UV-Strahlung optimiert. Bemessungsregel (2) ergibt eine Mindestkonzentration an Wasserstoff in Abhängigkeit von den Bestrahlungsbedingungen (Pulsenergiedichte und Pulszahl) an, unterhalb von der die defektausheilende Wirkung von Wasserstoff so gering ist, dass es während des bestimmungsgemäßen Einsatzes des optischen Bauteils zu nicht tolerierbaren Transmissionsverlusten kommt. Bemessungsregel (3) hingegen definiert eine Obergrenze an Wasserstoff in Abhängigkeit von den Bestrahlungsbedingungen (Pulsenergiedichte und Pulszahl), oberhalb der sich der zu RDP führende Schädigungsmechanismus deutlich auswirkt. Die angegebenen Wasserstoff-Konzentrationen beziehen sich jeweils auf den Bereich innerhalb des Quarzglas-Rohlings, der in dem daraus gefertigten optischen Bauteil der höchsten Strahlungsbelastung ausgesetzt ist. Üblicherweise handelt es sich dabei um das Zentrum des Bauteils bzw. des Quarzglas-Rohlings. Eine weitere Annäherung an den Idealfall wird erreicht, wenn für eine vorgegebene Pulsenergiedichte ϵ von mindestens $0,005 \text{ mJ/cm}^2$ ein Quarzglas mit einem OH-Gehalt C_{OH} , der folgender Bemessungsregel genügt, ausgewählt wird:

$$C_{OH} [\text{Gew-ppm}] = 1700 \cdot \epsilon^{0,4} \pm 50 \quad (4)$$

- 20 [0050] Im Idealfall tritt weder Kompaktierung noch Dekompaktierung auf. In der Praxis wird aber in Abhängigkeit von den Bestrahlungsbedingungen und den Quarzglas-Eigenschaften entweder Kompaktierung oder Dekompaktierung beobachtet. Es wurde überraschend gefunden, dass ein Quarzglas mit einem nach Bemessungsregel (4) ausgelegten OH-Gehalt dem genannten Idealfall nahe kommt, das heißt es zeigt weder eine auffällige Kompaktierung noch eine nennenswerte Dekompaktierung, wenn es kurzwelliger UV-Strahlung einer Wellenlänge von $< 250 \text{ nm}$ mit einer Pulsenergiedichte ϵ zwischen $0,005 \text{ mJ/cm}^2$ und $0,1 \text{ mJ/cm}^2$ ausgesetzt wird.
- 25 [0051] Für eine Pulsenergiedichte im Bereiche der genannten Untergrenze $\epsilon = 0,005 \text{ mJ/cm}^2$ ergibt die Bemessungsregel (4) einen mittleren OH-Gehalt zwischen 154 Gew-ppm und 254 Gew-ppm .
- [0052] Die Bemessungsregel (4) hat sich insbesondere für die Festlegung des OH-Gehalts im Hinblick auf geringe Kompaktierung und gleichzeitig geringe Dekompaktierung bewährt, wenn die Pulsenergiedichte kleiner als $0,03 \text{ mJ/cm}^2$, vorzugsweise kleiner als $0,01 \text{ mJ/cm}^2$, ist.
- 30 [0053] Für den oberen Grenzwert $\epsilon = 0,01 \text{ mJ/cm}^2$ ergibt sich dabei nach Bemessungsregel (4) ein OH-Gehalt zwischen 219 Gew-ppm und 319 Gew-ppm .
- [0054] Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen und anhand einer Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt
- 35 [0055] Fig. 1 ein Diagramm zur Erläuterung des Auftretens von Kompaktierung oder Dekompaktierung in Abhängigkeit vom OH-Gehalt des Quarzglases und der Pulsenergiedichte der Strahlung;
- [0056] Fig. 2 ein Diagramm zur Erläuterung des Auftretens von Kompaktierung oder Dekompaktierung in Abhängigkeit vom OH-Gehalt des Quarzglases bei konstanter Pulsenergiedichte als Funktion der Pulszahl.
- [0057] Bei dem Diagramm in Fig. 1 ist der OH-Gehalt C_{OH} in Gew-ppm (in der Figur angegeben als "OH content") gegen die Pulsenergiedichte ϵ in mJ/cm^2 (in der Figur angegeben als "energy density") aufgetragen. Die eingezeichnete Kurve beruht auf Schädigungsmessungen bei verschiedenen Quarzglas-Qualitäten, die sich in ihrem OH-Gehalt unterscheiden. Die Messung erfolgt unter Laserstrahlung einer Wellenlänge von 193 nm und bei einer Laserpulslänge zwischen 20 und 50 Nanosekunden . Die Laserpulslänge wird nach der in V. Liberman, M. Rotrischild, J. H. C. Sedlacek, R. S. Uttaro, A. Grenville "Excimer-laser-induced densification of fused silica: laser-fluence and material-grade effects on scaling law", Journal Non-Cryst. Solids 244 (1999) S. 159–171 beschriebenen Methode bestimmt.
- 45 [0058] Die unter den vorgenannten Bedingungen ermittelten Messwerte sind als Rauten dargestellt. Die Kurve repräsentiert diejenigen C_{OH}/ϵ -Paare, bei denen weder Kompaktierung noch Dekompaktierung beobachtet wird. Der Bereich (1) oberhalb der Kurve kennzeichnet den Bereich, in dem Kompaktierung auftritt, und der Bereich (2) unterhalb der Kurve kennzeichnet den Bereich, in dem Dekompaktierung auftritt.
- 50 [0059] Der Verlauf der Kurve lässt sich durch die Formel

$$C_{OH} [\text{Gew-ppm}] = 1700 \cdot \epsilon [\text{mJ/cm}^2]^{0,4}$$

annähernd beschreiben.

- 55 [0060] Anhand der Kurve oder der vorgenannten Formel kann somit für jede Pulsenergiedichte zwischen 0 und $0,15 \text{ mJ/cm}^2$ der OH-Gehalt ausgewählt werden, den ein Quarzglas aufweisen muss, damit es weder Kompaktierung noch Dekompaktierung zeigt.
- [0061] Mit Fig. 2 wird eine weitere Darstellung des Auftretens von Kompaktierung und Dekompaktierung bei einer konstanten Pulsenergiedichte von $0,03 \text{ mJ/cm}^2$ als Funktion der Pulszahl (in Fig. 2 X-Achsenbezeichnung "pulses") gegeben. Auf der Y-Achse von Fig. 2 ist die Wellenfrontverzerrung ("wavefront distortion") in Bruchteilen der Wellenlänge des eingestrahnten Lichts, – hier Licht einer Wellenlänge von 633 nm – aufgetragen. Die Wellenfrontverzerrung ergibt sich dadurch, dass die eingestrahlte, ebene Wellenfront durch räumlich unterschiedliche Brechungsindizes gestört wird. Die Wellenfrontverzerrung ist somit ein Maß für das Auftreten von Kompaktierung oder Dekompaktierung.
- 60 [0062] In Fig. 2 sind die Messwerte an einem Quarzglas mit 250 Gew-ppm OH und einem H_2 -Gehalt von $3 \times 10^{16} \text{ Moleküle/cm}^3$ sind als Rauten dargestellt. Hier wird Kompaktierung beobachtet. Die Messwerte an einem Quarzglas mit 1200 Gew-ppm OH und einem H_2 -Gehalt von $1 \times 10^{18} \text{ Moleküle/cm}^3$ sind als Kreise dargestellt. Hier wird Dekompaktierung beobachtet.
- 65 [0063] Messungen an einem optimiertem Quarzglas sind als offene Quadrate dargestellt, wobei weder Kompaktierung

noch Dekompaktierung beobachtet wird. Der OH-Gehalt beträgt hierbei 425 Gew-ppm.
 [0064] Beispiele für derartige Quarzgläser und Vergleichsbeispiele dazu zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nr.	OH-Gehalt [Gew-ppm]	H ₂ -Gehalt [Moleküle/cm ³]	SiH-Gruppen [Moleküle/cm ³]	O ²⁻ [g ⁻¹]	Δn [ppm]	Λ [nm/cm]	ϵ [mJ/cm ²]	Kompaktierung	Dekompaktierung	Induzierte Absorption
1	250	$< 1 \times 10^{15}$	$< 5 \times 10^{16}$	$< 10^{17}$	< 2	< 2	0,01	nicht gemessen	nicht gem.	Ja
2	250	2×10^{16}	$< 5 \times 10^{16}$	$< 10^{17}$	< 2	< 2	0,01	Nein	Nein	Nein
2a	250	3×10^{16}	$< 5 \times 10^{16}$	$< 10^{17}$	< 2	< 2	0,03	Ja	Nein	Nein
3	250	1×10^{17}	5×10^{16}	$< 10^{17}$	< 2	< 2	0,01	Nein	Ja	Ja
4	1	$< 1 \times 10^{15}$	$< 5 \times 10^{16}$	$> 10^{17}$	< 2	< 2	0,01	Ja	Nein	Ja
5	900	2×10^{16}	$< 5 \times 10^{16}$	$< 10^{17}$	< 2	< 1	0,01	Nein	Ja	Nein
6	600	2×10^{16}	$< 5 \times 10^{16}$	$< 10^{17}$	< 2	< 1	0,075	Nein	Nein	Nein
7	425	2×10^{16}	$< 5 \times 10^{16}$	$< 10^{17}$	< 2	< 1	0,03	Nein	Nein	Nein
8	425	2×10^{16}	$< 5 \times 10^{16}$	$< 10^{17}$	< 2	< 1	0,1	Ja	Nein	Nein
9	425	2×10^{16}	$< 5 \times 10^{16}$	$< 10^{17}$	< 2	< 1	0,005	Nein	Ja	Nein

[0065] Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse von Bestrahlungsmessungen an Quarzglas-Rohlingen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und bei verschiedenen Bestrahlungsbedingungen. In den drei letzten Spalten der Tabelle ist

qualitativ angegeben, ob der jeweilige Rohling Kompaktierung, Dekompaktierung oder induzierte Absorption zeigt.

[0066] Die in den Spalten 2 bis 7 genannten Eigenschaften werden jeweils an einem zylinderförmigen Quarzglasrohling mit einem Außendurchmesser von 240 mm und einer Dicke von 60 mm ermittelt. Es handelt sich dabei um Rohlinge für Linsen für ein Mikrolithographiegerät, das mit Excimer-Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 193 nm arbeitet. Abgesehen von einem geringen Übermaß, das bei der Fertigung der Linse noch abgetragen wird, entsprechen die Rohling-Abmessungen auch den Linsenabmessungen. Das dem CA-Bereich der daraus erhaltenen Linse entsprechende Quarzglas-Volumen wird hier durch die Kreisfläche der Linse – abzüglich eines Randes von wenigen Millimetern für die Linsenfassung – und der Dicke bestimmt. In der Spalte "O[±]" von Tabelle 1 ist die Sauerstoffdefektstellen-Konzentration angegeben, in der Spalte "Δn" die über den CA-Bereich ermittelte Brechungsindexdifferenz, und in der Spalte "A" die im CA-Bereich ermittelte maximale Doppelbrechung.

[0067] Zur Durchführung der Bestrahlungsversuche wurden aus den jeweiligen Quarzglas-Rohlingen stabförmige Proben mit einer Abmessung von 25 × 25 × 200 mm³ entnommen und in gleicher Art und Weise vorbereitet (Politur der gegenüberliegenden 25 × 25 mm²-Flächen).

[0068] Zur Klärung des Schädigungsverhaltens der Proben hinsichtlich Kompaktierung oder Dekompaktierung wurden die Proben mit UV-Strahlung einer Wellenlänge von 193 nm bestrahlt, wobei die Pulsenergiegedichte variiert wurde, wie in Spalte 8 von Tabelle 1 angegeben. Die Pulszahl bei diesen Bestrahlungsversuchen betrug jeweils 5 Milliarden.

[0069] In der Spalte "Induzierte Absorption" sind zwei Schädigungsmechanismen zusammengefasst, die sich in einem Anstieg der Absorption äußern, nämlich die lineare Absorptionszunahme und der eingangs beschriebene RDP. Zur Klärung des Schädigungsverhaltens der Proben hinsichtlich induzierter Absorption wurden die Proben ebenfalls mit UV-Strahlung einer Wellenlänge von 193 nm und mit der in Spalte 8 genannten Pulsenergiegedichte bestrahlt. Zur Feststellung des RDP's genügt eine Pulszahl von 1 Millionen Pulsen, während für die Ermittlung der linearen Absorptionszunahme eine Pulszahl von mindestens 1 Milliarde Pulsen erforderlich ist. Hierzu wird der Transmissionsverlust der Probe bestimmt, indem während der Laserbestrahlung die Abnahme der Intensität der verwendeten Laserstrahlung nach der Probe gemessen wird.

[0070] Nach den Bestrahlungsversuchen wurden Kompaktierung und Dekompaktierung bestimmt, indem mit einem handelsüblichen Interferometer (Zygo GPI-XP) bei einer Wellenlänge von 633 nm, die relative Zunahme bzw. Abnahme des Brechungsindex im bestrahlten Bereich im Vergleich zum unbestrahlten Bereich gemessen wurde.

[0071] Nachfolgend werden die Verfahren zu Herstellung der Quarzglas-Rohlinge, aus denen die Proben 1 bis 9 untersucht wurden, beispielhaft erläutert:

1. Rohlinge 1 bis 4

[0072] Hierbei handelt es sich um nach dem Sootverfahren hergestellte Quarzgläser.

Herstellung eines Sootkörpers

[0073] Hierbei werden mittels Knallgasbrennern auf einem Trägerrohr aus Aluminiumoxid mit einem Außendurchmesser von 40 mm unter Bildung eines porösen Sootkörpers schichtweise SiO₂-Partikel abgeschieden. Den Knallgasbrennern werden Glasausgangsstoffe und Brennstoffe zugeführt und in der dem jeweiligen Knallgasbrenner zugeordneten Brennerflamme zu SiO₂-Partikeln umgesetzt. Die Brenner werden während des Abscheideprozesses kontinuierlich entlang der Längsachse in einem vorgegebenen Bewegungsablauf mit einer Amplitude von 15 cm zwischen zwei ortsfesten Wendepunkten hin- und herbewegt, wobei eine SiO₂-Schicht nach der anderen auf dem Trägerrohr bzw. auf der Oberfläche des sich bildenden Sootkörpers abgeschieden wird, bis dieser einen Außendurchmesser von etwa 300 mm aufweist.

[0074] Nach Ende des Abscheideverfahrens und Entfernen des Trägerrohres wird das so erhaltene Sootrohr zum Entfernen der herstellungsbedingt eingebrachten Hydroxylgruppen einer Dehydratationsbehandlung unterworfen.

Dehydratationsbehandlung bei den Rohlingen 1 bis 3

[0075] Zum Zweck der Dehydratation wird das Sootrohr über eine Behandlungsdauer von etwa 8 Stunden bei einer Temperatur um 900°C in einer Vakuumkammer behandelt. Dadurch stellt sich eine im wesentlichen über das Volumen homogene Hydroxylgruppenkonzentration (OH-Gehalt) von etwa 250 Gew-ppm ein.

Dehydratationsbehandlung bei Rohling 4

[0076] Zum Zweck der Dehydratation wird das Sootrohr in vertikaler Ausrichtung in einen Dehydratationsofen eingebracht und zunächst bei einer Temperatur um 900°C in einer chlorhaltigen Atmosphäre behandelt. Die Behandlungsdauer beträgt etwa acht Stunden. Dadurch wird eine Hydroxylgruppenkonzentration (OH-Gehalt) von weniger als 10 Gew-ppm erhalten.

Verglasungsprozess bei den Rohlingen 1 und 4

[0077] Anschließend wird das behandelte Sootrohr in einem vertikal orientierten Vakuum-Verglasungssofen bei einer Temperatur im Bereich um 1400°C gesintert, indem es einer ringförmigen Heizzone zugeführt und darin zonenweise erhitzt wird. Nach dem Verglasen ist molekularer Wasserstoff in dem gesinterten (verglasten) Quarzglas-Rohr nicht mehr nachweisbar ($< 1 \times 10^{15}$ Moleküle/cm³). Der OH-Gehalt liegt in dem in Tabelle 1 genannten Bereich.

[0078] Nach dem Dehydratationsprozess wird das behandelte Sootrohr anschließend in einem vertikal orientierten Verglasungssofen bei einer Temperatur im Bereich um 1400°C gesintert, indem es einer ringförmigen Heizzone zugeführt und darin zonenweise erhitzt wird. Dabei wird im Verglasungssofen wasserstoffhaltige Atmosphäre mit einem Wasserstoffpartialdruck von 10 mbar aufrechterhalten. Nach der Behandlung zeigt das gesinterte (verglaste) Quarzglas-Rohr über seine Wandstärke einen inhomogenen Verlauf der Wasserstoff-Konzentration, derart, dass die Wasserstoffkonzentration von der Rohrmantelfläche und von der Rohrrinnenbohrung radial zur Mitte der Rohrwandung hin abnimmt. Über die Wandstärke gemittelt liegt der H₂-Gehalt nach dieser Prozessstufe bei etwa 4×10^{16} Molekülen/cm³. Der OH-Gehalt liegt in dem in Tabelle 1 genannten Bereich.

Verglasungsprozess bei Rohling 3

[0079] Bei Rohling 3 wird das behandelte Sootrohr anschließend in einem vertikal orientierten Verglasungssofen bei einer Temperatur im Bereich um 1400°C gesintert, indem es einer ringförmigen Heizzone zugeführt und darin zonenweise erhitzt wird. Dabei wird im Verglasungssofen wasserstoffhaltige Atmosphäre, mit einem Wasserstoffpartialdruck von 150 mbar, aufrechterhalten. Nach der Behandlung zeigt das gesinterte (verglaste) Quarzglas-Rohr über seine Wandstärke einen inhomogenen Verlauf der Wasserstoff-Konzentration, derart, dass die Wasserstoffkonzentration von der Rohrmantelfläche und von der Rohrrinnenbohrung radial zur Mitte der Rohrwandung hin abnimmt. Über die Wandstärke gemittelt liegt der H₂-Gehalt bei etwa 2×10^{17} Molekülen/cm³. Der OH-Gehalt liegt in dem in Tabelle 1 genannten Bereich.

Umformprozess und Homogenisieren der Rohlinge 1 bis 4

[0080] Aus dem gesinterten (verglasten) Quarzglas-Rohr wird durch Umformen und anschließendem Homogenisieren (Verdrillen und Wenden) ein Vollzylinder mit einem Außendurchmesser von 300 mm und einer Länge von 100 mm hergestellt. Der Rohling wird in einem Tempervorgang unter Luft und Atmosphärendruck auf 1100°C erhitzt und anschließend mit einer Abkühlrate von 1°C/h abgekühlt. Anschließend werden radial 30 mm und beidseitig axial 20 mm Übermass entfernt, um so Gradienten der Wasserstoffkonzentration bedingt durch Ausdiffusion zu vermeiden. Der Rohling weist den OH-Gehalt auf gemäß Tabelle 1 und den Wasserstoffgehalt wie in der Tabelle angegeben. Die Konzentration an Si-H-Gruppen beträgt – mit Ausnahme von Rohling 3 – weniger als 5×10^{16} Moleküle pro cm³ (jeweils gemessen im CA-Bereich). Es wird eine Spannungsdoppelbrechung von weniger als 2 nm/cm gemessen, und die Brechzahlverteilung ist derart homogen, dass der Unterschied zwischen dem Maximalwert und dem Minimalwert unterhalb von 2×10^{-6} liegt. Die Konzentration an Sauerstoffdefektstellen wird bei den Rohlingen 1, 2 und 3 mit weniger als 1×10^{17} pro g ermittelt, wohingegen sie bei Rohling 4 oberhalb dieses Wertes liegt.

[0081] Durch das Homogenisieren wird eine gleichmäßige Verteilung der genannten Komponenten über das gesamte Zylindervolumen erreicht. Dies gilt insbesondere auch für den Wasserstoffgehalt von Rohling 2 und 2a.

2. Rohlinge 5 und 6

[0082] Hierbei handelt es sich um nach dem Direktverglasungsverfahren hergestellte Quarzgläser.

Abscheideprozess

[0083] Auf einem scheibenförmigen, um seine Mittelachse rotierenden Substrat wird mittels eines Knallgasbrenners feinteiliges SiO₂ abgeschieden, das unmittelbar durch die Hitze der Knallgasflamme unter Bildung eines stabförmigen Quarzglasrohlings verglast wird. Aufgrund der verwendeten Ausgangssubstanzen ist der Quarzglasrohling praktisch chlorfrei (der Chlorgehalt liegt unterhalb von 1 Gew.-ppm). Der Wasserstoffgehalt liegt in dieser Verfahrensstufe noch bei etwa 1×10^{18} Molekülen/cm³.

Maßnahmen zum Einstellen der OH-Gehalte bei Rohling 5 und 6

[0084] Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, unterscheiden sich die Rohlinge 5 und 6 lediglich in den jeweiligen OH-Gehalten. Der OH-Gehalt wird dadurch vorgegeben, dass während des Abscheidevorgangs die Substrattemperatur durch Erhöhen bzw. Erniedrigen der Wasserstoff und Sauerstoffzufüsse im Knallgasbrenner eingestellt wird. Eine Temperaturerhöhung führt zu einem höheren OH-Gehalt, während eine Erniedrigung der Temperatur zu einem niedrigen OH-Gehalt führt.

Umformprozess und Homogenisieren der Rohlinge 5 und 6

[0085] Zum Homogenisieren wird der Quarzglasrohling anschließend in eine Quarzglas-Drehbank eingespannt, zonenweise auf eine Temperatur von ca. 2000°C erhitzt und dabei verdrillt. Ein dafür geeignetes Homogenisierungsverfahren ist in der EP-A1 673 888 beschrieben. Nach mehrmaligem Verdrillen liegt ein Quarzglaskörper in Form eines Rundstabes mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Länge von ca. 800 mm vor, der in drei Richtungen schlierenfrei ist.

[0086] Durch eine Heißverformung bei einer Temperatur von 1700°C und unter Verwendung einer stickstoffgespülten Schmelzform wird daraus ein kreisrunder Quarzglaszylinder mit einem Außendurchmesser von 300 mm und einer Länge von 100 mm gebildet. In einem Tempervorgang wird der Quarzglaszylinder unter Luft und Atmosphärendruck auf 1100°C erhitzt, für ca. 100 h bei dieser Temperatur gehalten und anschließend mit einer Abkühlrate von 1°C/h abgekühlt. Anschließend werden radial 30 mm und beidseitig axial 20 mm Übermass entfernt, um so Gradienten der Wasserstoffkonzentration bedingt durch Ausdiffusion zu vermeiden. Der Rohling weist eine Wasserstoffkonzentration von ca. $2 \times$

10¹⁶ Molekülen/cm³ und einen OH-Gehalt von ca. 900 Gew.-ppm (Rohling 5) bzw. von 600 Gew.-ppm (Rohling 6) auf. Es wird lediglich noch eine Spannungsdoppelbrechung von maximal 2 nm/cm gemessen, und die Brechzahlverteilung ist derart homogen, dass der Unterschied zwischen dem Maximalwert und dem Minimalwert unterhalb von 2×10^{-6} liegt.

[0087] Der so hergestellte Quarzglaszylinder ist als Rohling für die Herstellung einer optischen Linse für ein Mikrolithographiegerät unmittelbar geeignet.

3. Rohlinge 7 bis 9

[0088] Die Rohlinge 7 bis 9 bestehen aus dem gleichen Quarzglas. Es handelt sich um eine Quarzglas-Qualität, die durch Mischen von nach dem Sootverfahren hergestelltem Quarzglas und nach dem Direktverglasungsverfahren hergestelltem Quarzglas erhalten wird.

[0089] Hierzu wird ein Quarzglas-Stab aus einem dem Rohling 2 oder 2a entsprechenden Quarzglas, und ein weiterer Quarzglas-Stab aus einem dem Rohling 6 entsprechenden Quarzglas hergestellt und miteinander vermischt. Die Mengenverhältnisse der beiden Quarzglas-Qualitäten werden dabei so gewählt, dass sich bei Einsatz des Mischquarzglas in Verbindung mit UV-Strahlung einer Wellenlänge von 193 nm und einer Pulsenergie $\epsilon = 0,03$ mJ/cm² ein OH-Gehalt einstellt, der folgender Bemessungsregel genügt:

$$C_{OH} [\text{Gew.-ppm}] = 1700 \cdot \epsilon^{0,4} \quad (\epsilon \text{ in mJ/cm}^2)$$

[0090] Mit $\epsilon = 0,03$ mJ/cm² ergibt sich nach dieser Bemessungsregel ein im Mischquarzglas einzustellender OH-Gehalt von etwa 425 Gew.-ppm (genau: 418 Gew.-ppm).

[0091] Da das Quarzglas entsprechend Rohling 2 (bzw. Rohling 2a) einen OH-Gehalt von 250 Gew.-ppm und das Quarzglas entsprechend Rohling 6 einen OH-Gehalt von 600 Gew.-ppm aufweist, werden zur Einstellung eines OH-Gehalts im Mischquarzglas von 425 Gew.-ppm gleiche Mengen beider Quarzglas-Qualitäten benötigt. Diese werden jeweils in Form von Quarzglas-Stäben mit einem Gewicht von 8 kg bereitgestellt. Die Quarzglas-Stäbe werden miteinander verdreht, indem die Stäbe sich zunächst längsseitig berührend angeordnet, zonenweise auf eine Temperatur von etwa 2000°C erhitzt, dabei erweicht und um eine gemeinsame, parallel zur Längsachse verlaufende Rotationsachse unter Bildung einer Misch-Quarzglas rotiert werden. Zur Beseitigung verbleibender Schlieren wird anschließend das in der EP-A1 673 888 beschriebene mehrmalige Verdrehen und Wenden durchgeführt.

[0092] Durch anschließende Heißverformung bei einer Temperatur von 1700°C und unter Verwendung einer stickstoffgespülten Schmelzform wird daraus ein kreisrunder Mischquarzglaszylinder mit einem Außendurchmesser von 300 mm und einer Länge von 100 mm gebildet. In einem Tempervorgang wird der Quarzglaszylinder unter Luft und Atmosphärendruck auf 1100°C erhitzt, für ca. 50 h bei dieser Temperatur gehalten und anschließend mit einer Abkühlrate von 1°C/h abgekühlt. Danach werden radial 30 mm und beidseitig axial 20 mm Übermass entfernt, um so Gradienten der Wasserstoffkonzentration bedingt durch Ausdiffusion zu vermeiden. Der Rohling weist eine Wasserstoffkonzentration von ca. 2×10^{16} Molekülen/cm³ und einen OH-Gehalt von ca. 425 Gew.-ppm auf, was dem Mittelwert des OH-Gehalts der ursprünglichen Rohlinge 2 und 6 entspricht. Es wird lediglich noch eine Spannungsdoppelbrechung von maximal 2 nm/cm gemessen, und die Brechzahlverteilung ist derart homogen, dass der Unterschied zwischen dem Maximalwert und dem Minimalwert unterhalb von 2×10^{-6} liegt.

[0093] Auch dieser Quarzglas-Block ist als Rohling für die Herstellung einer optischen Linse für ein Mikrolithographiegerät unmittelbar geeignet.

Maßnahmen zur Auswahl der Ober- und Untergrenze des H₂-Gehaltes

[0094] Für die Auswahl der Obergrenze und der Untergrenze des H₂-Gehalts gelten die Bemessungsregeln (2) und (3) in Verbindung mit der typischen Einsatz-Pulsenergiedichte von 0,03 mJ/cm².

$$C_{H2min} [\text{Moleküle/cm}^3] = 1,0 \times 10^6 (0,03)^2 P \quad (2)$$

$$C_{H2max} [\text{Moleküle/cm}^3] = 2 \times 10^{18} (0,03) \quad (3)$$

[0095] Mit $\epsilon = 0,03$ mJ/cm² ergibt sich nach dieser Bemessungsregel und einer maximalen Pulszahl von 1×10^{12} ein im Quarzglas einzustellender minimaler H₂-Gehalt von 9×10^{14} Molekülen/cm³ und ein maximaler H₂-Gehalt von 6×10^{16} Molekülen/cm³.

[0096] Die Einstellung des vorgegebenen H₂-Gehaltes erfolgt durch die oben beschriebene Temperung der Rohlinge bei 1100°C unter Berücksichtigung der dabei ablaufenden Diffusionsprozesse.

[0097] Zum Homogenisieren wird der Quarzglasrohling in eine Quarzglas-Drehbank eingespannt, zonenweise auf eine Temperatur von ca. 2000°C erhitzt und dabei verdreht. Ein dafür geeignetes Homogenisierungsverfahren ist in der EP-A1 673 888 beschrieben. Nach mehrmaligem Verdrehen liegt ein Quarzglaskörper in Form eines Rundstabes mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Länge von ca. 800 mm vor, der in drei Richtungen schlierenfrei ist.

[0098] Durch eine Heißverformung bei einer Temperatur von 1700°C und unter Verwendung einer stickstoffgespülten Schmelzform wird daraus ein kreisrunder Quarzglaszylinder mit einem Außendurchmesser von 240 mm und einer Länge von 80 mm gebildet. Nach einem weiteren Tempervorgang, bei der der Quarzglaszylinder unter Luft und Atmosphärendruck auf 1100°C erhitzt und anschließend mit einer Abkühlrate von 2°C/h auf 900°C abgekühlt wird, wird lediglich noch eine Spannungsdoppelbrechung von maximal 2 nm/cm gemessen, und die Brechzahlverteilung ist derart homogen, dass der Unterschied zwischen dem Maximalwert und dem Minimalwert unterhalb von 2×10^{-6} liegt. Aus den zentralen Bereich des Rohlings wird eine stabförmige Probe mit einer Abmessung von $25 \times 25 \times 200$ mm³ entnommen, die einen H₂ Gehalt von ca. 2×10^{16} Molekülen/cm³ und ca. 425 Gew.-ppm OH aufweist.

[0099] Hinsichtlich des Auftretens von Kompaktierung, Dekompaktierung und induzierter Absorption gemäß Tabelle 1 zeigen die Rohlinge 2 und 7 bei einer Energiedichte von 0,01 bzw. 0,03 mJ/cm² die besten Ergebnisse. Rohling 2a mit einem geringfügig höheren H₂-Gehalt als Rohling 2 zeigt bei Einwirkung von ultravioletter Strahlung einer Energiedichte von 0,03 mJ/cm² Kompaktierung (vergleiche Fig. 2), was je nach Anwendungsfall in Grenzen tolerierbar sein kann. Rohling 6 zeigt grundsätzlich ein gutes Ergebnis hinsichtlich Kompaktierung, Dekompaktierung und induzierter Absorption, dies allerdings nur bei einer verhältnismäßig hohen Energiedichte von 0,075 mJ/cm². In Bezug auf den relativ hohen OH-Gehalt bei Rohling 6, der tendenziell eher zu Dekompaktierung führt, ist dessen Einsatz zum Mischen mit einem Rohling, der nach dem Sootverfahren hergestellt ist und einen besonders niedrigen OH-Gehalt aufweist, besonders geeignet. Dies wird durch die Ergebnisse von Rohling 7 bestätigt.

Patentansprüche

1. Quarzglasrohling für ein optisches Bauteil zur Übertragung ultravioletter Strahlung einer Wellenlänge von 250 nm und kürzer mit einer Glasstruktur im wesentlichen ohne Sauerstoffdefektstellen, einem H₂-Gehalt im Bereich von $0,1 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ bis $4,0 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³, einem OH-Gehalt im Bereich von 125 Gew-ppm bis 450 Gew-ppm, einem Gehalt an SiH-Gruppen von $< 5 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³, einer Inhomogenität im Brechungsindex Δn von weniger als 2 ppm und einer Spannungsdoppelbrechung von weniger als 2 nm/cm.
2. Quarzglasrohling nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der OH-Gehalt im Bereich von 200 Gew-ppm bis 350 Gew-ppm liegt.
3. Quarzglasrohling nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der H₂-Gehalt im Bereich von 1×10^{16} Moleküle/cm³ bis 3×10^{16} Moleküle/cm³ liegt.
4. Verfahren zur Herstellung eines Quarzglasrohlings nach einem der Ansprüche 1 bis 3 umfassend die Herstellung mindestens einer ersten, zylinderförmigen Quarzglasvorform durch Flammenhydrolyse einer Si-enthaltenden Verbindung, wobei SiO₂-Partikel gebildet und auf einem rotierenden Träger schichtweise unter Bildung eines porösen Sootkörpers abgeschieden werden und der Sootkörper anschließend zu der Quarzglasvorform verglast wird, die über ihr Volumen einen inhomogenen H₂-Konzentrationsverlauf aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die Quarzglasvorform einer Homogenisierungsbehandlung unterzogen wird, durch welche ein radialer H₂-Konzentrationsverlauf mit einer maximalen Abweichung von 25% von einem Mittelwert, der im Bereich von $0,1 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ bis $4,0 \times 10^{16}$ Molekülen/cm³ liegt, eingestellt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Homogenisierungsbehandlung ein radialer H₂-Konzentrationsverlauf mit einer maximalen Abweichung von 15% vom Mittelwert eingestellt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Quarzglasvorform durch Verglasen des Sootkörpers unter einer H₂-enthaltenden Atmosphäre hergestellt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die H₂-enthaltende Atmosphäre beim Verglasen eine H₂/He-Atmosphäre oder eine H₂/N₂-Atmosphäre oder eine H₂/H₂O-Atmosphäre ist.
8. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Quarzglasvorform einer den Wasserstoffgehalt absenkenden Temperbehandlung unterzogen wird.
9. Verfahren zur Herstellung eines Quarzglasrohlings nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Homogenisierungsbehandlung durch Verdrillen und Wenden der Quarzglasvorform erfolgt.
10. Verfahren zur Herstellung eines Quarzglasrohlings nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Homogenisierungsbehandlung ein Mischen der ersten Quarzglasvorform mit einer zweiten Quarzglasvorform unter Bildung eines Mischquarzglases mit einem OH-Gehalt im Mittel im Bereich von 125 bis 450 Gew-ppm, insbesondere 200 bis 350 Gew-ppm, umfasst, wobei ein H₂-Gehalt von $0,1 \times 10^{16}$ Moleküle/cm³ bis 4×10^{16} Moleküle/cm³ eingestellt wird.
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung der zweiten Quarzglasvorform SiO₂-Partikel gebildet und auf einen rotierenden Träger abgeschieden und direkt verglast werden.
12. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Quarzglas einen OH-Gehalt im Bereich von 10 Gew-ppm bis 300 Gew-ppm, das zweite Quarzglas einen OH-Gehalt im Bereich von 400 Gew-ppm bis 1300 Gew-ppm aufweist.
13. Verwendung eines Quarzglasrohlings nach einem der Ansprüche 1 bis 3, für die Herstellung eines Bauteils für den Einsatz in der Mikrolithographie in Verbindung mit ultravioletter Strahlung einer Wellenlänge von 250 nm und kürzer, dadurch gekennzeichnet, dass für eine vorgegebene Pulszahl P ein Quarzglas ausgewählt wird, das einen Mindestwasserstoffgehalt C_{H2min} und einen Maximalwasserstoffgehalt C_{H2max} aufweist, die folgenden Bemessungsregeln genügen:

$$C_{H2min} [\text{Moleküle/cm}^3] = 1,0 \times 10^6 \varepsilon^2 P \quad (2) \text{ und}$$

$$C_{H2max} [\text{Moleküle/cm}^3] = 2,0 \times 10^{18} \varepsilon \quad (3)$$

(Pulsenergiedichte ε jeweils in mJ/cm²).

14. Verwendung eines Quarzglasrohlings nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass für einen Einsatz mit ultravioletter Strahlung einer vorgegebenen Pulsenergiedichte ε von mindestens 0,005 mJ/cm² ein Quarzglas mit einem OH-Gehalt ausgewählt wird, der folgender Bemessungsregel genügt:

$$C_{OH} [\text{Gew-ppm}] = 1,7 \times 10^3 \cdot \varepsilon^{0,4} \pm 50 \quad (4).$$

15. Verwendung eines Quarzglasrohrlings nach Anspruch 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Energiedichte ϵ kleiner als $0,03 \text{ mJ/cm}^2$, insbesondere kleiner als $0,01 \text{ mJ/cm}^2$ ist.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

Fig. 1

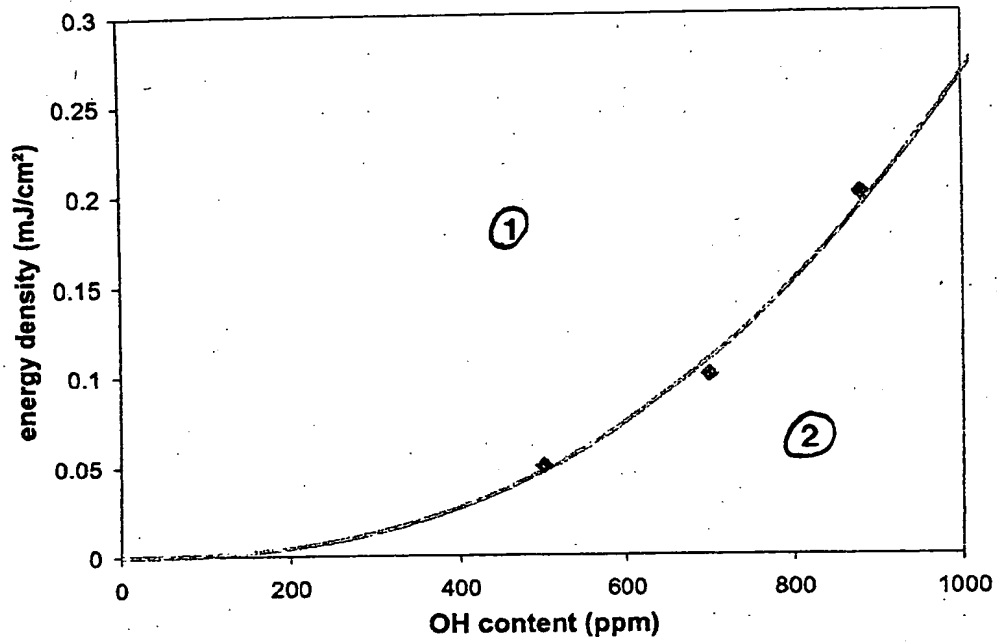


Fig. 2

